

【発明の名称】 半導体発光素子及びその駆動装置

【発明の背景】

本発明は、3端子構成の発光ダイオード素子又は半導体レーザ素子等の半導体発光素子及びその駆動装置に関する。

発光ダイオード素子は、リモートコントロール装置や光ファイバ通信における安価で且つ高信頼性を有する発光素子として広く用いられている。

しかしながら、従来の発光ダイオード素子は高速通信、すなわち高速変調を行なうには応答速度が遅く、その上、変調周波数の上限が低いという問題がある。

発光ダイオード素子を始めとする半導体発光素子の動作速度を制限する要因の一つに、活性層に注入されたキャリアが再結合する際の再結合速度による制約がある。発光素子が有する活性領域に注入されたキャリアは、電流の注入が停止されてもすぐには消失せず、再結合速度により決まる時定数により徐々に減少していく。

キャリアが活性領域に残留している間は発光状態が持続するため、これが発光素子の変調時における高速応答を妨げる原因となる。特に、発光ダイオード素子は自然放出光を利用しており、その発光量は活性領域のキャリア量にほぼ比例するため、残留キャリアによる応答速度に対する影響が大きい。例えば、III-V族のヒ化アルミニウムガリウム（AlGaAs）系の化合物半導体からなる発光ダイオード素子は、通常、キャリアの再結合速度の時定数が数ナノ秒（ns）であるため、変調周波数が1GHzを超えるような高速変調を行なうことは困難である。

キャリア再結合速度による変調速度の制約を解消する従来技術として、トランジスタ素子と同様の3端子構成を用いる発光素子が特開昭60-167390号公報に開示されている。

図17は前記公報に開示された3端子発光素子の断面構成を示している。

図17に示すように、前記公報の半導体発光素子は、バイポーラトランジスタと同様に、p型の半導体基板901上に順次形成された、p型のコレクタ層902、n型のベース層903及びp型のエミッタ層905を備えている。

ベース層 903 とエミッタ層 905 との間には、活性層 904 が設けられており、活性層 904 の周囲は n 型の埋込み層 907 により埋め込まれている。

エミッタ層 905 の上には p 型コンタクト層 906 を介してエミッタ電極 909 が形成され、埋込み層 907 の上には n 型コンタクト層 908 を介してベース電極 910 がエミッタ電極 909 を囲むように形成されている。半導体基板 901 のコレクタ層 902 と反対側の面上にはコレクタ電極 911 が形成されている。

以下、前記従来の半導体発光素子の動作を説明する。

図 18 は従来の半導体発光素子における発光時の電子のエネルギー帯のバンド構造を示している。縦軸は電子のエネルギーを表わし、 $E_c$  は伝導帯の下端のエネルギー、 $E_v$  は価電子帯の上端のエネルギー、 $E_F$  は電子又はホール の擬フェルミレベルのエネルギーの概要をそれぞれ表わしている。また、エネルギー準位に付した符号は図 17 に示した半導体層とそれぞれ対応している。

ここでは、発光時の駆動電圧の一例として、ベース層 904 とエミッタ層 905 との間に順方向（順バイアス）電圧を印加し、ベース層 904 とコレクタ層 902 とを等電位の 0 V としている。

ベース層 903 とエミッタ層 905 との間に順バイアス電圧が印加されているため、活性層 904 には、ベース層 903 から注入される電子とエミッタ層 905 から注入されるホールとが蓄積されて、これら電子とホールとが再結合して発光する。p 型のコレクタ層 902 と n 型のベース層 903 との間は p n 接合による空乏層が生成されるが、ベース層 903 の少なくとも一部は空乏化されないため、空乏化されない部分から活性層 904 に電子が供給される。また、ベース層 903 はホールを活性層に閉じ込める障壁として機能する。

次に、消光時には、ベース層 903 とコレクタ層 902 との間に逆方向（逆バイアス）電圧を印加する。その結果、図 19 のバンド図に示すように、ベース層 904 がほぼ全域にわたって空乏化され、活性層 904 に閉じ込められていたホールはコレクタ層 902 に引き抜かれる。このとき、十分に高い効率で活性層 904 のホールを引き抜くことができれば、活性層 904 におけるホール濃度は低下し、発光再結合の結合量が減少して発光が抑制される。また、このホールの引

き抜き動作はキャリアの発光再結合速度に依存しないので、発光を速やかに停止でき、その結果、高速変調が可能となる。

本願発明者らは、前記従来の３端子構成の半導体発光素子に対して種々の検討を重ねた結果、消光動作時に低電圧駆動を行なうと、ホールの一部が活性層 904 に残留してしまい、消光時にも発光が残ってしまうという問題を見出している。すなわち、発光時と消光時との発光量の比からなる消光比の値を大きく取ることが困難であるという問題である。

図 20 は従来の半導体発光素子の消光時における活性層 904 及びその近傍の価電子帯の上端のバンド構造を拡大して表わしている。図 20 に示すように、消光時には、活性層 904 とベース層 903 との間には両者間のヘテロ接合に起因する価電子帯オフセットによって界面障壁（スパイク）920 が発生する。コレクタ層 902 に印加する逆バイアス電圧の電位差を増大してもこの界面障壁 920 の高さ（エネルギーの大きさ）は変わらず、ホールがコレクタ層 902 に引き抜かれる際の障壁となる。ホールの一部は逆バイアス電圧により界面障壁 920 を越えてコレクタ方向に移動するが、この界面障壁 920 の高さよりも低いエネルギーのホールは活性層 904 とベース層 903 との界面に残留してしまう。より高い逆バイアス電圧を印加すれば、低エネルギーのホールもその一部はトンネル電流によってコレクタ層 902 に輸送されるが、逆バイアス電圧の絶対値を大きくすると素子自体の発熱量も増大し、また消費電力が増大する。

このとき、エミッタ層 905 から活性層 904 にホールが供給されるため、活性層 904 とベース層 903 との界面でホール濃度が高くなると、活性層 904 全体でのホールの蓄積量が増加する。このため、従来の半導体発光素子においては、低い逆バイアス電圧で活性層 904 におけるホールの量を十分に減少させることは困難であり、消光時にも活性層 904 において相当量の発光が生じてしまう。

このように、前記従来の３端子構成の半導体発光素子は、低電圧駆動時に消光比を大きくすることは困難である。

#### 【発明の概要】

本発明は、前記従来の問題を解決し、低電圧で高速動作と実用的な消光比とを得られるようにすることを目的とする。

前記の目的を達成するため、本発明に係る第1の半導体発光素子は、それぞれが第1導電型の第1の半導体層及び第2の半導体層と、第1の半導体層及び第2の半導体層の間に設けられた第2導電型の第3の半導体層と、第2の半導体層と第3の半導体層との間に設けられ、第2の半導体層及び第3の半導体層から注入される電荷により発光する活性層と、活性層と第3の半導体層との間に設けられ、活性層との界面では活性層の組成とほぼ同一で且つ第3の半導体層との界面では第3の半導体層の組成とほぼ同一となるように、その組成が変化する傾斜組成層とを備えている。

前述したように、公知の半導体発光素子は、第3の半導体層をベース層とすると、活性層とベース層とがヘテロ接合により構成されるため、消光時の逆バイアス電圧の印加時にバンドオフセットにより界面障壁が発生する。しかしながら、本発明の第1の半導体発光素子によると、活性層と第3の半導体層との間に傾斜組成層を備えているため、バンドオフセットがなくなるので、界面障壁が発生しない。その結果、低い逆バイアス電圧であっても、活性層のキャリアの残存量を十分に低下させることができるので、低電圧駆動で消光比を大きくすることができる。

本発明に係る第2の半導体発光素子は、それぞれが第1導電型の第1の半導体層及び第2の半導体層と、第1の半導体層及び第2の半導体層の間に設けられ、電子のエネルギー帯における禁制帯幅が第1の半導体層及び第2の半導体層よりも小さい第2導電型の第3の半導体層と、第1の半導体層と第3の半導体層との間に設けられ、第1の半導体層との界面では第1の半導体層の組成とほぼ同一で且つ第3の半導体層との界面では第3の半導体層の組成とほぼ同一となるように、その組成が変化する傾斜組成層とを備え、第3の半導体層は、第2の半導体層及び第3の半導体層から注入される電荷により発光する。

第2の半導体発光素子は、第3の半導体層をベース層とすると、該ベース層の禁制帯幅が第1の半導体層及び第2の半導体層の各禁制帯幅よりも小さいため、実質的な活性層となる。このように、独立した活性層を持たない構成の半導体発

光素子であっても、第1の半導体層（コレクタ層）と第3の半導体層（ベース層）との間に傾斜組成層を備えており、バンドオフセットがなくなるため、界面障壁が発生しない。その結果、低い逆バイアス電圧であっても、第3の半導体層のキャリアの残存量を十分に低下させることができるので、低電圧駆動で消光比を大きくすることができる。

本発明に係る第3の半導体発光素子は、それぞれがp導電型の第1の半導体層及び第2の半導体層と、第1の半導体層及び第2の半導体層の間に設けられ、電子のエネルギー帯における禁制帯幅が第1の半導体層及び第2の半導体層よりも小さいn導電型の第3の半導体層とを備え、第3の半導体層は、第2の半導体層及び第3の半導体層から注入される電荷により発光し、電子のエネルギー帯における価電子帯の上端のエネルギー値は、第1の半導体層の方が第2の半導体層よりも小さい。

第3の半導体発光素子によると、本発明の第2の半導体発光素子と同様に第3の半導体層が実質的な活性層となる。その上、第1の半導体層をコレクタ層とし、第2の半導体層をエミッタ層とすると、価電子帯の上端のエネルギー値は、第1の半導体層であるコレクタ層の方が第2の半導体層であるエミッタ層よりも小さいため、発光時にエミッタ層からの電流の注入を妨げることなく、コレクタ層からの電流の注入を抑制することができる。さらに、エミッタ層からコレクタ層へのリーク電流をも抑制することができ、消光比を大きくすることができる。

本発明に係る第4の半導体発光素子は、それぞれがn導電型の第1の半導体層及び第2の半導体層と、第1の半導体層及び第2の半導体層の間に設けられ、電子のエネルギー帯における禁制帯幅が第1の半導体層及び第2の半導体層よりも小さいp導電型の第3の半導体層とを備え、第3の半導体層は、第2の半導体層及び第3の半導体層から注入される電荷により発光し、電子のエネルギー帯における伝導帯の下端のエネルギー値は、第1の半導体層の方が第2の半導体層よりも大きい。

第4の半導体発光素子によると、本発明の第2の半導体発光素子と同様に第3の半導体層が実質的な活性層となる。その上、第1の半導体層をコレクタ層とし、第2の半導体層をエミッタ層とすると、電子のエネルギー帯における伝導帯の

下端のエネルギー値は、第1の半導体層であるコレクタ層の方が第2の半導体層であるエミッタ層よりも大きいいため、発光時にエミッタ層からの電流の注入を妨げることなく、コレクタ層からの電流の注入を抑制することができる。さらに、エミッタ層からコレクタ層へのリーク電流をも抑制することができ、消光比を大きくすることができる。

第2～第4の半導体発光素子において、第2の半導体層の不純物濃度が、少なくとも第1の半導体層と対向する側の領域が第1の半導体層の不純物濃度よりも大きいことが好ましい。ここで、第1の半導体層をコレクタ層とし、第2の半導体層をエミッタ層とすると、第2の半導体層が第1の半導体層よりも不純物濃度が大きいいため、第2の半導体層（エミッタ層）からのキャリアの注入効率が向上する。

本発明に係る第5の半導体発光素子は、それぞれが第1導電型の第1の半導体層及び第2の半導体層と、第1の半導体層及び第2の半導体層の間に設けられ、電子のエネルギー帯における禁制帯幅が第1の半導体層及び第2の半導体層よりも小さい第2導電型の第3の半導体層と、第1の半導体層と第3の半導体層との間に設けられ、第1の半導体層及び第3の半導体層の不純物濃度よりも小さい不純物濃度を持つ低濃度半導体層とを備え、第3の半導体層は、第2の半導体層及び第3の半導体層から注入される電荷により発光する。

第5の半導体発光素子によると、本発明の第2の半導体発光素子と同様に第3の半導体層が実質的な活性層となる。その上、第1の半導体層と第3の半導体層との間に低濃度半導体層を備えているため、第1の半導体層をコレクタ層とすると、消光時において、第3の半導体層（ベース層）と第1の半導体層（コレクタ層）との間の界面障壁における電位勾配が急峻となるので、該界面障壁部分にキャリアが残存することを防止することができる。その結果、低い逆バイアス電圧であっても、第3の半導体層の電子の残存量を十分に低下させることができるので、低電圧駆動で消光比を大きくすることができる。

第5の半導体発光素子において、低濃度半導体層が不純物がドーブされていない無添加層であることが好ましい。

第5の半導体発光素子において、低濃度半導体層が第2導電型であることが好

ましい。このようにすると、第1の半導体層（コレクタ層）と第3の半導体層（ベース層）との間に設けられた低濃度半導体層は、第1の半導体層との間でpn接合となる。従って、発光時に、コレクタ・ベース間に順方向バイアス電圧を印加しても第1の半導体層（コレクタ層）から第3の半導体層（ベース層）に注入されるキャリアに対する障壁が発生する。この障壁により第1の半導体層（コレクタ層）の電位と第2の半導体層（エミッタ層）の電位とを同一の値としても第1の半導体層（コレクタ層）からの逆方向のキャリアの注入を防ぐことができる。

本発明に係る半導体発光素子の駆動装置は、それぞれが第1導電型の第1の半導体層及び第2の半導体層と、第1の半導体層及び第2の半導体層の間に設けられた第2導電型の第3の半導体層とを有する半導体発光素子を駆動する駆動装置を対象とし、定電流制御手段と、半導体発光素子の発光状態を制御する発光状態制御手段と、半導体発光素子の第3の半導体層に所定の電位を印加する所定電位印加手段とを備え、定電流制御手段は半導体発光素子の第2の半導体層に対して所定の駆動電流を供給し、発光状態制御手段は、第1の半導体層に対して互いに異なる電圧を印加するか、又は第1の半導体層を互いに異なるインピーダンス状態とすることにより、半導体発光素子の発光量を調節する。

本発明の半導体発光素子の駆動装置によると、3端子構成の半導体発光素子を確実に発光させたり消光させたりすることができる。

#### 【図面の簡単な説明】

図1は本発明の第1の実施形態に係る3端子構成のpn<sub>1</sub>p型の半導体発光素子を示す構成断面図である。

図2は本発明の第1の実施形態に係る半導体発光素子における消光時の活性層及びその近傍の価電子帯端の電子のエネルギー帯を示すバンド図である。

図3は本発明の第2の実施形態に係る3端子構成のnpn型の半導体発光素子を示す構成断面図である。

図4は本発明の第3の実施形態に係る3端子構成のpn<sub>1</sub>p型の半導体発光素子を示す構成断面図である。

図5は本発明の第3の実施形態に係る半導体発光素子の発光時における電子のエネルギー帯のバンド図である。

図6は本発明の第3の実施形態に係る半導体発光素子の消光時における電子のエネルギー帯のバンド図である。

図7は本発明の第4の実施形態に係る3端子構成のnpn型の半導体発光素子を示す構成断面図である。

図8は本発明の第5の実施形態に係る3端子構成のpnp型の半導体発光素子を示す構成断面図である。

図9(a)は本発明の第5の実施形態に係る半導体発光素子の消光時における電子のエネルギー帯のバンド図である。

図9(b)は比較用であって、無添加半導体層を設けない半導体発光素子の消光時における電子のエネルギー帯のバンド図である。

図10は本発明の第6の実施形態に係る3端子構成のpnp型の半導体発光素子を示す構成断面図である。

図11は本発明の第6の実施形態に係る半導体発光素子の発光時における電子のエネルギー帯のバンド図である。

図12は本発明の第6の実施形態に係る半導体発光素子の消光時における電子のエネルギー帯のバンド図である。

図13は本発明の第6の実施形態の一変形例に係る半導体発光素子の発光時における電子のエネルギー帯のバンド図である。

図14は本発明の第6の実施形態の一変形例に係る半導体発光素子の消光時における電子のエネルギー帯のバンド図である。

図15は本発明の第7の実施形態に係る半導体発光素子の駆動装置を示す機能ブロック図である。

図16は本発明の第8の実施形態に係る半導体発光素子の駆動装置を示す機能ブロック図である。

図17は従来の3端子構成の半導体発光素子を示す構成断面図である。

図18は従来の半導体発光素子の発光時における電子のエネルギー帯のバンド図である。



図 1 9 は従来の半導体発光素子の発光時における電子のエネルギー帯のバンド図である。

図 2 0 は従来の半導体発光素子における消光時の活性層及びその近傍の価電子帯端の電子のエネルギー帯を示すバンド図である。

#### 【発明の詳細な説明】

##### (第 1 の実施形態)

本発明の第 1 の実施形態について図面を参照しながら説明する。

本発明の各実施形態においては、3 端子構成の半導体発光素子における 3 種類の半導体層にバイポーラトランジスタと同様の呼称を用いる。すなわち、第 1 導電型の第 1 の半導体層をコレクタ層と呼び、第 1 導電型の第 2 の半導体層をエミッタ層と呼び、第 2 導電型の第 3 の半導体層をベース層と呼ぶ。

図 1 は本発明の第 1 の実施形態に係る 3 端子構成の半導体発光素子であって、GaAs/GaInP 系の化合物半導体からなる pnp 型の半導体発光素子の断面構成を示している。

図 1 に示すように、第 1 の実施形態に係る半導体発光素子は、p 型ヒ化ガリウム (GaAs) からなる基板 101 上に順次形成された、p 型リン化ガリウムインジウム (GaInP) からなるコレクタ層 102、膜厚が約 300 nm の n 型 GaInP からなるベース層 103、膜厚が約 50 nm の傾斜組成層 104、膜厚が約 100 nm の GaAs からなる活性層 105、及び p 型 GaInP からなるエミッタ層 106 を有している。

第 1 の実施形態の特徴である、ベース層 103 と活性層 105 との間に設けられた傾斜組成層 104 は、その組成がベース層 103 との界面では該ベース層 103 の組成とほぼ同一であり、活性層 105 との界面では該活性層 105 の組成とほぼ同一となるように構成されている。なお、傾斜組成層 104 の膜厚は約 5 nm ～ 約 100 nm であれば、界面障壁の発生を抑制することができる。また、傾斜組成層 104 の組成は、連続的に変化させても良く、段階的に変化させても良い。また、傾斜組成層 104 における活性層 105 側の領域は発光光が生成されるため、該領域は活性層 105 の一部とみなすこともできる。

基板 101 のコレクタ層 102 と反対側の面上には p 型コレクタ電極 108 が形成されている。

活性層 105 の上面は露出しており、露出した領域上にはエミッタ層 106 の側面から間隔をおいて n 型ベース電極 109 が形成されている。このように、第 1 の実施形態に係る n 型ベース電極 109 は、ベース層 103 の上面に直接に設けるのではなく、傾斜組成層 104 及び活性層 105 を介在させて設けている。このように、電子のエネルギー帯の禁制帯幅がベース層 103 の禁制帯幅よりも小さい活性層 105 を n 型ベース電極 109 の実質的なコンタクト層として用いているため、n 型ベース電極 109 のコンタクト抵抗を低減することができる。

また、電子の注入効率を優先するため、活性層 105 及び傾斜組成層 104 における n 型ベース電極 109 とエミッタ層 106 との間の領域が除去されずに残されているが、この領域を除去することにより、エミッタ層 106 から注入されるホールの閉じ込め効率を向上することもできる。

エミッタ層 106 の上には、その一部に高濃度の p 型 GaAs からなる p 型コンタクト層 107 が形成されており、該 p 型コンタクト層 107 の上には p 型エミッタ電極 110 が形成されている。

第 1 の実施形態においては、傾斜組成層 104 及び活性層 105 の不純物濃度を約  $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  とし、コレクタ層 102、ベース層 103 及びエミッタ層 106 の不純物濃度をいずれも約  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  としている。

また、第 1 の実施形態においては、コレクタ層 102、ベース層 103 及びエミッタ層 106 に、GaAs からなる基板 101 にほぼ格子整合する組成を持つ GaInP からなる混晶を用いている。これにより、GaInP からなるコレクタ層 102、ベース層 103 及びエミッタ層 106 と、GaAs からなる活性層 105 との間のバンドオフセットを大きく取りながら、コレクタ層 102、ベース層 103 及びエミッタ層 106 の各抵抗率を低く抑えることができる。

また、ベース層 103 と活性層 105 とを互いに分離して設けているため、n 型ベース電極 109 から基板面に平行な方向に注入されるキャリアの注入抵抗が小さくなるので、素子抵抗に起因する動作遅延や消費電力の増大を抑制することができる。

以下、前記のように構成された半導体発光素子の発光動作及び消光動作を説明する。

第1の実施形態に係る半導体発光素子は、発光時には、ベース層103とエミッタ層106との間に順バイアス電圧を印加し、且つベース層103とコレクタ層102との間の電位を0Vとすることによりキャリアを活性層105に閉じ込める。閉じ込められたキャリア、すなわち電子とホールとが活性層105において再結合することにより発光光が生成される。

消光時は、ベース層103とコレクタ層102との間に逆バイアス電圧を印加する。このときの活性層105及びその近傍の価電子帯端のバンド構造を図2に示す。図2において、エネルギー準位に付した符号は図1に示した半導体層とそれぞれ対応している。

図2に示すように、活性層105とベース層103との間には、活性層105との界面で該活性層105の組成とほぼ同一で且つベース層103との界面で該ベース層103の組成とほぼ同一となるようにその組成が徐々に変化する傾斜組成層104を設けているため、活性層105とベース層103との間の界面障壁は図17に示した従来例に係る半導体発光素子と比べて大幅に低下する。このため、比較的に低い逆バイアス電圧であっても、活性層105と傾斜組成層104との界面に達したホールは速やかにコレクタ層103に移動するので、活性層105のベース層103側の領域におけるホール濃度が著しく低減する。その結果、活性層105の全体に蓄積されるホールの総量も減少するので、消光時における半導体発光素子の残留発光量を大幅に低減することができる。

また、図示はしていないが、発光時においても、活性層105とベース層103との間に傾斜組成層104を設けたことにより、活性層105とベース層103との間の伝導帯の下端のエネルギー障壁（スパイク）も低減される。これにより、発光時における活性層105への電子の注入効率も向上する。

以上説明したように、第1の実施形態によると、従来例に係る半導体発光素子の場合よりも低い逆バイアス電圧で高い消光比を実現できる。このため、発光動作と消光動作との高速駆動が可能となる。

また、第1の実施形態に係る半導体発光素子は、従来の発光ダイオード素子と

異なり、ベース・コレクタ間の空乏層が発光時においても生成されるため、ベース層103とコレクタ層102との間の静電容量が小さくなり、高速変調による動作に適する。

また、ベース層103をn型としているため、ベース層103から注入される多数キャリアが、ホールと比べて移動度が高い電子となるので、基板面に平行な方向の電荷注入における注入抵抗が低減する。逆に、p型のエミッタ層106からn型のベース層103に注入される少数キャリアが、電子と比べて拡散長が短いホールとなるので、基板面に平行な方向の少数キャリアの拡散を抑制することができる。

#### (第2の実施形態)

以下、第2の実施形態について図面を参照しながら説明する。

図3は本発明の第2の実施形態に係る3端子構成の半導体発光素子であって、InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>系の化合物半導体からなるnpn型の半導体発光素子の断面構成を示している。

図3に示すように、第2の実施形態に係る半導体発光素子は、サファイア(A<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)からなる絶縁性基板201上に順次形成された、n型窒化ガリウム(GaN)からなるエミッタ層202、窒化インジウムガリウム(InGa<sub>N</sub>)からなる活性層203、傾斜組成層204、膜厚が約400nmのp型GaNからなるベース層205、及びn型GaNからなるコレクタ層206を有している。

第2の実施形態においても、活性層203とベース層205との間に設けられた傾斜組成層204は、その膜厚が約5nm～約100nmであって、その組成が活性層203との界面では該活性層203の組成とほぼ同一であり、ベース層205との界面では該ベース層205の組成とほぼ同一となるように構成されている。また、傾斜組成層204における活性層203側の領域は発光光が生成されるため、該領域は活性層203の一部とみなすこともできる。

エミッタ層202の上面は露出しており、露出した領域上には活性層203及び傾斜組成層204等の側面から間隔をおいてn型エミッタ電極209が形成されている。また、ベース層205の上面は露出しており、露出した領域上にはコレクタ層206の側面から間隔をおいてp型ベース電極210が形成されている。

コレクタ層 206 の上には、その一部に高濃度の n 型 GaAs からなる n 型コンタクト層 207 が形成されており、該 n 型コンタクト層 207 の上には n 型コレクタ電極 208 が形成されている。

第 2 の実施形態に係る半導体発光素子において、エミッタ層 202 における p 型ベース電極 210 と対向する領域であって、コレクタ層 206 と対向しない領域にはイオン注入により形成された高抵抗領域 202a が設けられている。このように、n 型のエミッタ層 202 における n 型のコレクタ層 206 と対向しない領域に高抵抗領域 202a を設けることにより、n 型のエミッタ層 202 における n 型のコレクタ層 206 と対向しない領域から活性層 203 へのキャリアの注入が抑制されるため、消光時において、コレクタ層 206 からのキャリア（電子）の引き抜きが十分に行なえずに残留するキャリアによって生じる発光による消光比の劣化を防ぐことができる。

また、絶縁性基板 201 は、発光光の波長に対して透明であるため、該絶縁性基板 201 のエミッタ層 202 と反対側の面から発光光の大部分を外部に取り出すことができる。

第 2 の実施形態に係る半導体発光素子は、npn 型の構成であるため、発光時にはベース層 205 からホールが供給されると共に、エミッタ層 202 から電子が供給される。

一方、消光時には活性層 203 からコレクタ層 206 に電子が引き抜かれて、電子とホールとの再結合が停止する。このとき、活性層 203 とベース層 205 との間には、活性層 203 との界面で該活性層 203 の組成とほぼ同一で且つベース層 205 との界面で該ベース層 205 の組成とほぼ同一となるようにその組成が徐々に変化する傾斜組成層 204 を設けているため、低電圧で迅速なキャリアの引き抜きが可能となるので、第 1 の実施形態と同様に、低電圧で消光比が大きい高速変調を実現できる。

#### （第 3 の実施形態）

以下、本発明の第 3 の実施形態について図面を参照しながら説明する。

図 4 は本発明の第 3 の実施形態に係る 3 端子構成の半導体発光素子であって、

AlGaAs系の化合物半導体からなるpn型の半導体発光素子の断面構成を示している。

図4に示すように、第3の実施形態に係る半導体発光素子は、p型GaAsからなる基板301上に順次形成された、p型ヒ化アルミニウムガリウム ( $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ ) からなるコレクタ層302、膜厚が約70nmの傾斜組成層303、膜厚が約300nmのn型GaAsからなるベース層304、及びp型  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  からなるエミッタ層305を有している。

第3の実施形態の特徴である、コレクタ層302とベース層304との間に設けられた傾斜組成層303は、その組成がコレクタ層302との界面では該コレクタ層302の組成とほぼ同一であり、ベース層304との界面では該ベース層304の組成とほぼ同一となるように構成されている。なお、傾斜組成層303の膜厚は約5nm～約100nmであればよい。

また、n型GaAsからなるベース層304における電子のエネルギー帯の禁制帯幅は、p型AlGaAsからなるコレクタ層302及びエミッタ層305の禁制帯幅よりも小さい。

基板301のコレクタ層302と反対側の面上にはp型コレクタ電極307が形成されている。

ベース層304の上面は露出しており、露出した領域上にはエミッタ層305の側面から間隔をおいてn型ベース電極308が形成されている。

エミッタ層305の上には、その一部に高濃度のp型GaAsからなるp型コンタクト層306が形成されており、該p型コンタクト層306の上にはp型エミッタ電極309が形成されている。

第3の実施形態においては、コレクタ層302、傾斜組成層303及びベース層304の不純物濃度を約  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  としている。一方、エミッタ層305の不純物濃度は  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  としており、コレクタ層302の不純物濃度と比べて10倍程度の高い値に設定している。これにより、エミッタ層305におけるホールの擬フェルミレベルがコレクタ層302におけるホールの擬フェルミレベルと比べて価電子帯の上端に接近するため、エミッタ層305からベース層304へのキャリアの注入効率がコレクタ層302からベース層304への注

入効率と比べて向上する。なお、エミッタ層 305 の不純物濃度は、コレクタ層 302 の不純物濃度の 2 倍程度に大きくすれば、エミッタ層 305 からのキャリアの注入効率をコレクタ層 302 から注入される場合よりも大きくすることができる。また、エミッタ層 305 の不純物濃度は、少なくともコレクタ層 302 と対向する部位が 2 倍以上高ければ効果を奏する。

また、エミッタ層 305 には p 型  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  を用い、コレクタ層 302 にはエミッタ層 305 と比べてアルミニウムの組成が大きい p 型  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  を用いている。これにより、コレクタ層 302 の電子のエネルギー帯における電子親和力と禁制帯幅との和は約  $50\text{ meV}$  大きくなる。言い換えると、コレクタ層 302 の価電子帯の上端のエネルギー値は、エミッタ層 305 の価電子帯の上端のエネルギー値よりも約  $50\text{ meV}$  小さくなる。なお、コレクタ層 302 の価電子帯の上端のエネルギー値は、エミッタ層 305 よりも  $10\text{ meV}$  程度小さければ、発光時におけるホールのコレクタ層 302 への流出を抑制することができる。また、エミッタ層 305 からコレクタ層 302 へのリーク電流を抑制できると共に、コレクタ層 302 からベース層 304 へのキャリアの逆注入をも抑制することができる。

以下、前記のように構成された半導体発光素子の発光動作及び消光動作を説明する。

まず、発光時の動作を説明する。

図 5 は発光時におけるベース層 304 とその近傍の電子のエネルギー帯のバンド構造を表わしている。図 5 において、エネルギー準位に付した符号は図 4 に示した半導体層とそれぞれ対応している。第 3 の実施形態に係る半導体発光素子は第 1 及び第 2 の実施形態に係る半導体発光素子と異なり、ベース層 304 とエミッタ層 305 との間に独立した活性層を設けていない。前述したように、ベース層 304 の禁制帯幅がコレクタ層及びエミッタ層 305 と比べて小さいため、ベース層 304 とエミッタ層 305 との間及びベース層 304 とコレクタ層 302 との間に、順バイアス電圧を同時に印加することにより、ベース層 304 に多数キャリアである電子とエミッタ層 305 から供給されるホールとを閉じ込めることができるため、ベース層 304 において電子とホールとの再結合により発光す

る。すなわち、第3の実施形態に係るベース層304は、電子の輸送及び供給の機能と活性層としての機能とを併せもつ。

発光時のベース・コレクタ間の電圧は、ベース・エミッタ間の電圧よりも約0.1V低く設定している。これにより、エミッタ層305からのみホールを供給でき、コレクタ層302からベース層304へのホールの注入が抑制される。

この結果、図4において、ベース層304におけるエミッタ層305が除去されている領域では発光せずに、ベース層304とエミッタ層305とが互いに対向する領域のみで発光する。

ここで、コレクタ層302の価電子帯の上端のエネルギー値がエミッタ層305と比べて10meV以上小さいことにより、エミッタ層305からベース層304に注入されたホールがコレクタ層302に流出するリーク電流を抑制できる。また、コレクタ層302からベース層304へのホールの注入が抑制される。

次に、消光時の動作を説明する。

図6は消光時におけるベース層304とその近傍の電子のエネルギー帯のバンド構造を表わしている。

消光時には、ベース層304とエミッタ層305との間に順バイアス電圧を印加すると共に、ベース層304とコレクタ層302とを等電位とする。これによりベース層304とコレクタ層302との間に空乏層が広がるため、ベース層304は傾斜組成層303との界面でホールを閉じ込められなくなる。その結果、ベース層304に蓄積されていたホールがコレクタ層302に放出されるので、ベース層304のホール濃度が低減して、素子の発光量が減少する。このホールの放出動作はキャリアの再結合速度に依存しないので高速である。

また、第3の実施形態に係る半導体発光素子は、ベース層304とコレクタ層302との間に、ベース層304との界面では該ベース層304の組成とほぼ同一で且つコレクタ層302との界面では該コレクタ層302の組成とほぼ同一となるようにその組成が徐々に変化する傾斜組成層303を設けているため、消光時におけるベース層304とコレクタ層302との間の界面障壁は、傾斜組成層303を設けない素子と比べて大幅に低下する。これにより、ベース層304と傾斜組成層303との界面に達したホールは速やかにコレクタ層302に移動す



るため、消光時の素子発光はさらに抑制される。

このように、第3の実施形態によると、低い逆バイアス電圧で高い消光比を実現できるため、発光動作と消光動作との高速駆動が可能となる。

その上、消光時には、ベース・コレクタ間の電位を等電位としており、逆バイアス電圧を印加する必要がないため、駆動回路の構成を簡略化でき、駆動方法も容易となる。

#### (第4の実施形態)

以下、本発明の第4の実施形態について図面を参照しながら説明する。

図7は本発明の第4の実施形態に係る3端子構成の半導体発光素子であって、 $\text{AlGaAs}$ 系の化合物半導体からなるnpn型の半導体発光素子の断面構成を示している。

図7に示すように、第4の実施形態に係る半導体発光素子は、n型GaAsからなる基板401上に順次形成された、n型 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ からなるコレクタ層402、膜厚が約20nmの傾斜組成層403、膜厚が約300nmのp型GaAsからなるベース層404、及びn型 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ からなるエミッタ層405を有している。

第4の実施形態の特徴である、コレクタ層402とベース層404との間に設けられた傾斜組成層403は、その組成がコレクタ層402との界面では該コレクタ層402の組成とほぼ同一であり、ベース層404との界面では該ベース層404の組成とほぼ同一となるように構成されている。なお、傾斜組成層403の膜厚は約5nm～約100nmであればよい。

また、p型GaAsからなるベース層404における電子のエネルギー帯の禁制帯幅は、n型 $\text{AlGaAs}$ からなるコレクタ層402及びエミッタ層405の禁制帯幅よりも小さい。

基板401のコレクタ層402と反対側の面上にはn型コレクタ電極407が形成されている。

ベース層404の上面は露出しており、露出した領域上にはエミッタ層405の側面から間隔をおいてp型ベース電極408が形成されている。

エミッタ層405の上には、その一部に高濃度のn型GaAsからなるn型コ

ンタクト層406が形成されており、該n型コンタクト層406の上にはn型エミッタ電極409が形成されている。

第4の実施形態に係る半導体発光素子において、コレクタ層402におけるp型ベース電極408と対向する領域であって、エミッタ層405と対向しない領域にはイオン注入により形成された高抵抗領域402aが設けられている。

また、傾斜組成層403及びベース層404の不純物濃度を約 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ とし、コレクタ層402の不純物濃度を約 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ としている。一方、エミッタ層405の不純物濃度は約 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ としており、コレクタ層402の不純物濃度と比べて2倍程度の高い値に設定している。これにより、エミッタ層405からベース層404へのキャリアの注入効率が向上する。

なお、エミッタ層405の不純物濃度は、少なくともコレクタ層402と対向する部位が2倍以上高ければ効果を奏する。

第4の実施形態においては、エミッタ層405にはn型 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ を用い、コレクタ層402にはエミッタ層405と比べてアルミニウムの組成が大きいn型 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ を用いている。これにより、コレクタ層402の電子のエネルギー帯における電子親和力は約 $10 \text{ meV}$ 小さくなる。言い換えると、コレクタ層402の伝導帯の下端のエネルギー値は、エミッタ層405の伝導帯の下端のエネルギー値と比べて約 $10 \text{ meV}$ 大きくなる。これにより、発光時における電子のコレクタ層402への流出を抑制することができる。また、エミッタ層405からコレクタ層402へのリーク電流を抑制できると共に、コレクタ層402からベース層404への電子の逆注入をも抑制することができる。

このように、npn型の3端子素子である第4の実施形態の半導体発光素子は、独立した活性層の代わりに、ベース層404の禁制帯幅をコレクタ層402及びエミッタ層405の禁制帯幅よりも小さく設定して、該ベース層404に再結合光を生成する発光機能を持たせている。

従って、第4の実施形態に係る半導体発光素子は、第3の実施形態とは逆の導電型であるため、発光時にはエミッタ層405からベース層404に電子が供給され、消光時にはベース層404からコレクタ層402に電子が引き抜かれる。このとき、第3の実施形態と同様に、ベース層404とコレクタ層402と

の間に傾斜組成層 403 を設けていること、エミッタ層 405 の不純物濃度をコレクタ層 402 よりも大きくしていること、及びコレクタ層 402 の伝導帯の下端をエミッタ層 405 よりも低くしていることにより、高速動作を実現することができる。

また、第 3 の実施形態と同様に、消光時にベース・コレクタ間に逆バイアス電圧を印加する必要がないため、駆動回路を簡略化できる。

その上、第 4 の実施形態においては、コレクタ層 402 におけるエミッタ層 405 と対向しない領域に高抵抗領域 402a を設けているため、コレクタ層 402 からベース層 404 へ向かう逆方向のキャリアの注入を抑制することができる。その結果、コレクタ層 402 とエミッタ層 405 とに対して等電位を印加したとしても、ベース層 404 の周縁部において不要な発光光が生成されることがなくなるので、半導体発光素子に対する駆動方法が容易となり且つ発光効率も向上する。

#### (第 5 の実施形態)

以下、本発明の第 5 の実施形態について図面を参照しながら説明する。

図 8 は本発明の第 5 の実施形態に係る 3 端子構成の半導体発光素子であって、 $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}/\text{GaInP}$  系の化合物半導体からなる pnp 型の半導体発光素子の断面構成を示している。

図 8 に示すように、第 5 の実施形態に係る半導体発光素子は、p 型 GaAs からなる基板 501 上に順次形成された、p 型 GaInP からなるコレクタ層 502、真性の GaInP からなるコレクタ側無添加層 503a 及び真性の GaAs からなるベース側無添加層 503b からなり総膜厚が約 120 nm の無添加半導体層 503、膜厚が約 300 nm の n 型 GaAs からなるベース層 504、並びに p 型  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  からなり、上部がリッジ状にパターニングされたエミッタ層 505 を有している。

第 5 の実施形態の特徴である、コレクタ層 502 とベース層 504 との間に設けられた無添加半導体層 503 の不純物濃度は、 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  以下である。

また、n 型 GaAs からなるベース層 504 における電子のエネルギー帯の禁制帯幅は、p 型 GaInP からなるコレクタ層 502 及び p 型  $\text{AlGaAs}$  から

なるエミッタ層505の禁制帯幅よりも小さい。

基板501のコレクタ層502と反対側の面上にはp型コレクタ電極507が形成されている。

ベース層504の上面は露出しており、露出した領域上にはエミッタ層505の側面から間隔をおいてn型ベース電極508が形成されている。

エミッタ層505のリッジ状領域の上には、高濃度のp型GaAsからなるp型コンタクト層506が形成されており、また、エミッタ層505上で且つリッジ状領域の側方には二酸化シリコン(SiO<sub>2</sub>)からなる電流狭窄層510がその上面がp型コンタクト層506の上面とほぼ一致するように埋め込まれている。電流狭窄層510の上にはp型コンタクト層506と接触するようにp型エミッタ電極509が形成されている。

第3の実施形態においては、ベース層504の不純物濃度は約 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ とし、一方、コレクタ層502及びエミッタ層505の不純物濃度は $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ としている。

また、エミッタ層505にはp型Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>Asを用い、コレクタ層502にはGaAsからなる基板501とほぼ格子整合する組成を持つp型GaInPを用いている。これにより、コレクタ層502の電子のエネルギー帯における電子親和力と禁制帯幅との和はエミッタ層505と比べて約50meV以上大きくなる。すなわち、コレクタ層502の価電子帯の上端のエネルギー値は、エミッタ層505の価電子帯の上端のエネルギー値よりも約50meV以上小さくなる。なお、コレクタ層502の価電子帯の上端のエネルギー値は、エミッタ層505よりも10meV程度小さければ、発光時におけるホールのコレクタ層502への流出を抑制することができる。

このように、エミッタ層505にAlGaAsを用い、コレクタ層502にGaInPを用い、ベース層504にGaAsを用いることにより、各半導体層のヘテロ接合面によるバンドオフセットを大きくしながら、コレクタ層502の抵抗率を低く抑えることができる。

なお、第5の実施形態に係る半導体発光素子は、その上面がp型エミッタ電極509により覆われ且つ電流狭窄層510を有する構成を採るため、ベース層5

04で生成される発光光は基板501の表裏方向ではなく、発光素子のへき開端面から放出される。

第5の実施形態の特徴として、コレクタ層502とベース層504との間に、不純物濃度が $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下である無添加半導体層503を設けているため、エミッタ層505とコレクタ層502との不純物濃度をほぼ同一の値に設定しても、エミッタ層505からコレクタ層502へのリーク電流を抑制することができる。その上、コレクタ層502からベース層504への逆方向のホール注入をも抑制することができる。

さらに、無添加半導体層503により、発光時のベース・コレクタ間の静電容量が低下するため、高速駆動が容易になる。

また、消光時には、図9(a)のバンド構造に示すように、無添加半導体層503により、ベース・コレクタ間の界面障壁（スパイク）における電位勾配が急峻となるため、該界面障壁にホールが蓄積されにくくなり、消光比の値を大きくすることができる。図9(b)は比較用であって、ベース層504とコレクタ層502との間に無添加半導体層503を設けない場合の消光時のバンド構造を示している。図9(b)に示すように、ベース層504とコレクタ層502との間に無添加半導体層503を設けない場合には、ベース層504とコレクタ層502との界面にバンドオフセットによる界面障壁が発生する。

第5の実施形態は、第3の実施形態と同様に、消光時にベース・コレクタ間に逆バイアス電圧を印加する必要がないため、駆動回路を簡略化することができる。

なお、第5の実施形態においては、無添加半導体層503をコレクタ側無添加層503aとベース側無添加層503bとにより構成して、コレクタ層502及びベース層504の両界面にそれぞれ無添加層を設けているが、このうちの一方のみを無添加層とすることもできる。

また、ベース層504又はコレクタ層502の各不純物分布を制御することにより、ベース層504及びコレクタ層502の界面における不純物濃度を抑制することは容易である。

なお、無添加半導体層503を構成するコレクタ側無添加層503aとベース

側無添加層 503b との間に無添加の傾斜組成層を設けてもよい。このようにすると、消光時の界面障壁を低減することができる。また、この場合に、コレクタ側無添加層 503a 及びベース側無添加層 503b に代えて、無添加半導体層 503 を傾斜組成層のみとしてもよい。

また、第 5 の実施形態においては、ベース層 504 に GaAs を用いているが、アルミニウムを添加した  $Al_xGa_{1-x}As$  (但し、 $x$  は  $0 < x \leq 0.3$  とする。) を用いて、ベース層 504 の禁制帯幅を拡大すると、発光光の短波長化を図ることができる。

また、エミッタ層 502 に AlGaAs を用いているが、コレクタ層 502 と同様に GaInP を用いると、ベース層 504 におけるキャリアの閉じ込め効果を向上することができる。逆に、コレクタ層 502 に AlGaAs を用いることにより、ベース層 504 とコレクタ層 502 との間に無添加半導体層 503 又は傾斜組成層を形成する際の製造プロセスを容易にすることができる。

#### (第 6 の実施形態)

以下、本発明の第 6 の実施形態について図面を参照しながら説明する。

図 10 は本発明の第 6 の実施形態に係る 3 端子構成の半導体発光素子であって、GaAs / AlGaAs 系の化合物半導体からなる pnp 型の半導体発光素子の断面構成を示している。

図 10 に示すように、第 6 の実施形態に係る半導体発光素子は、p 型 GaAs からなる基板 601 上に順次形成された、p 型  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  からなるコレクタ層 602、n 型の低濃度ベース層 603、膜厚が約 300 nm の n 型 GaAs からなるベース層 604、及び p 型  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  からなるエミッタ層 605 を有している。

n 型 GaAs からなるベース層 604 における電子のエネルギー帯の禁制帯幅は、p 型 AlGaAs からなるコレクタ層 602 及びエミッタ層 605 の禁制帯幅よりも小さい。

第 6 の実施形態の特徴である、コレクタ層 602 とベース層 604 との間に設けられた低濃度ベース層 603 は、コレクタ層 602 側から順次形成された、膜厚が約 35 nm の n 型  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  からなるコレクタ側低濃度層 603a

、膜厚が約 25 nm の傾斜組成層 603b、及び膜厚が約 10 nm の n 型 GaAs からなるベース側低濃度層 603c とにより構成されている。ここで、コレクタ側低濃度層 603a、傾斜組成層 603b 及びベース側低濃度層 603c の不純物濃度はいずれも  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  に設定されている。

また、傾斜組成層 603b は、その組成がベース側低濃度層 603c との界面では該ベース側低濃度層 603c の組成とほぼ同一であり、コレクタ側低濃度層 603a との界面では該コレクタ側低濃度層 603a の組成とほぼ同一となるように構成されている。

基板 601 のコレクタ層 602 と反対側の面上には p 型コレクタ電極 607 が形成されている。

ベース層 604 の上面は露出しており、露出した領域上にはエミッタ層 605 の側面から間隔をおいて n 型ベース電極 608 が形成されている。

エミッタ層 605 の上には、その一部に高濃度の p 型 GaAs からなる p 型コンタクト層 606 が形成されており、該 p 型コンタクト層 606 の上には p 型エミッタ電極 609 が形成されている。

第 6 の実施形態においては、ベース層 604 の不純物濃度を約  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  とし、コレクタ層 605 の不純物濃度を約  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  としている。一方、エミッタ層 605 の不純物濃度は  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  としており、コレクタ層 602 の不純物濃度と比べて 10 倍程度の高い値に設定している。これにより、エミッタ層 605 からベース層 604 へのキャリアの注入効率がコレクタ層 602 からベース層 604 への注入効率と比べて向上する。なお、エミッタ層 605 の不純物濃度は、コレクタ層 602 の不純物濃度の 2 倍程度に大きくすればエミッタ層 605 からの注入効率の向上に有効である。また、エミッタ層 605 の不純物濃度は、少なくともコレクタ層 602 と対向する部位が 2 倍以上高ければ効果を奏する。

また、コレクタ側低濃度層 603a の電子のエネルギー帯における電子親和力と禁制帯幅との和はベース層 604 と比べて約 20 meV 以上大きいことが好ましい。すなわち、コレクタ側低濃度層 603a の価電子帯の上端のエネルギー値は、ベース層 604 の価電子帯の上端のエネルギー値よりも約 20 meV 以上小

さいことが好ましい。このようにすると、発光時において、コレクタ・ベース間に順バイアス電圧を印加しても、コレクタ層 602 からベース層 604 に移動するキャリアに対する障壁が発生する。

また、半導体発光素子の導電型をそれぞれ反転させる場合であって、コレクタ側低濃度層 603a の導電型を n 型とする場合には、伝導帯の下端のエネルギー値がベース層 604 よりも約 20 meV 以上大きいことが好ましい。

以下、前記のように構成された半導体発光素子の発光動作及び消光動作を説明する。

まず、発光時の動作を説明する。

図 11 は発光時におけるベース層 604 とその近傍の電子のエネルギー帯のバンド構造を表わしている。図 11 において、エネルギー準位に付した符号は図 10 に示した半導体層とそれぞれ対応している。

発光時には、ベース層 604 とエミッタ層 605 とに、及びベース層 604 とコレクタ層 602 とにそれぞれ同電位の順バイアス電圧を印加する。

図 11 に示すように、第 6 の実施形態においては、エミッタ層 605 とコレクタ層 602 のそれぞれの価電子帯の上端のエネルギー値は同等であるが、n 型のベース層 604 と p 型のコレクタ層 602 との間に n 型の低濃度ベース層 603 を設けていることにより、該低濃度ベース層 603 とコレクタ層 602 との pn 接合により、ベース層 604 とコレクタ層 602 との間にホールに対するエネルギー障壁 600 が発生する。このエネルギー障壁 600 により、エミッタ層 605 の電位とコレクタ層 602 の電位とを全く同一の値としてもコレクタ層 602 からベース層 604 への逆方向のホール注入を防ぐことができる。その結果、図 10 に示すベース層 604 における n 型ベース電極 608 の下側部分及びベース層 604 の露出部分での発光光の生成を抑制することができる。

その上、エミッタ層 605 とコレクタ層 602 との電位を同一の値に設定できるため、素子の駆動方法が容易となり、且つエミッタ層 605 からコレクタ層 602 へのリーク電流も生じない。

また、コレクタ層 602 からベース層 604 への逆方向のキャリアの注入を防ぐことができるため、第 4 の実施形態のようにコレクタ層 402 に高抵抗領域 4



02aを設ける必要がなく、素子の製造プロセスが簡単化する。

また、低濃度ベース層603により生じるエネルギー障壁600により、発光時においてエミッタ層605とコレクタ層602と電位が多少異なっている、エミッタ層605とコレクタ層602との間のリーク電流が抑制される。

さらに、発光時には、低濃度ベース層603とコレクタ層602との界面に空乏層が生じるため、ベース層604とコレクタ層602との間の静電容量が低下するので、低濃度ベース層603を設けない素子と比べて高速駆動時の応答が改善される。

以下、第6の実施形態に係る半導体発光素子の消光動作を説明する。

図12は消光時における電子のエネルギー帯のバンド構造を表わしている。図12において、エネルギー準位に付した符号は図10に示した半導体層とそれぞれ対応している。

消光時には、エミッタ層605をベース層604に対して順バイアス電圧を印加すると共に、コレクタ層602とベース層604とを等電位とする。これにより、コレクタ層602がベース層604に対して、順バイアス電圧の印加時と比べて空乏層の幅が拡大するため、低濃度ベース層603及びコレクタ層602によるホールの閉じ込めができなくなる。その結果、ベース層604のホールがコレクタ層602に引き出されてエミッタ・コレクタ間に多くの電流が流れる一方、ベース層604のホール濃度が低下してベース層604からの発光量は抑制される。

第6の実施形態においては、コレクタ側低濃度層603aとベース側低濃度層603cとの間に傾斜組成層603bを設けているため、コレクタ側低濃度層603aとベース側低濃度層603cとの間の界面障壁が緩和されるので、特に、消光時のキャリアに対する引き抜き効果が向上する。その結果、第6の実施形態に係る半導体発光素子は高速な発光動作及び消光動作を行なうことができる。

また、第6の実施形態においては、消光時にベース・コレクタ間に逆バイアス電圧を印加する必要がなく、さらには、コレクタ層602からベース層604へのホールの逆注入が抑制されるため、素子の製造のみならず駆動方法も容易となる。

以下、第6の実施形態の一変形例として、コレクタ側低濃度層603aとベース側低濃度層603cの間の傾斜組成層603bを省略した構成を説明する。このようにすると、その成長時に組成を徐々に変化させる必要がある傾斜組成層603bを形成しなくても済むため、素子の製造プロセスを簡略化することができる。

図13及び図14は本変形例に係る半導体発光素子におけるバンド構造であって、図13は発光時を表わし、図14は消光時を表わしている。

図14に示すように、消光時はベース層604とコレクタ層602との間に、エネルギーバンドの不連続に起因する界面障壁（スパイク）が発生するが、コレクタ側低濃度層603aを設けていることにより、スパイクの位置が高電界の空乏層の中央部に位置するため、スパイクの影響が抑制される。その結果、ベース層604に蓄積されていたホールをコレクタ層602に確実に引き抜くことができ、消光時の素子の発光を抑えることができる。

なお、第6の実施形態及びその変形例において、低濃度ベース層603の不純物濃度は、ベース層604の不純物濃度の2分の1以下であることが好ましい。

さらには、低濃度ベース層603の不純物濃度が $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \sim 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ であり、その膜厚が30nm～400nmであることが好ましい。これにより、エミッタ層605とコレクタ層602とを等電位とすると、低濃度ベース層603がキャリアに対するエネルギー障壁として機能し、また、ベース層604とコレクタ層602とを等電位とすると、該エネルギー障壁を除去できるため、第6の実施形態に係る半導体発光素子の駆動を容易に且つ確実に行なえるようぬなる。

また、低濃度ベース層603における、コレクタ側低濃度層603a、傾斜組成層603b及びベース側低濃度層603cの不純物濃度の制御は、例えばコレクタ側低濃度層603aを例に採ると、まず、コレクタ層602と同等のp型不純物イオンをドーピングしながら成膜しておき、その後、コレクタ側低濃度層603aの形成部分に対してn型不純物イオンをドーピングすることにより、コレクタ側低濃度層603aのn型不純物濃度を低濃度としてもよい。

なお、第1～第6の各実施形態においては、半導体発光素子の一例として、自

然放出光を利用する発光ダイオード素子を挙げたが、本発明は誘導放出光を利用する端面出射型又は面発光型の半導体レーザ素子等にも応用することもできる。

また、半導体発光素子を構成する半導体材料には、III-V族化合物半導体、例えば、GaAs、AlAs、InAs、GaP、AlP、InP、GaN、AlN又はInN等を用いることができる。また、II-VI族化合物半導体、例えば、ZnSe、CdSe、MgSe、ZnS、CdS、ZnTe、CdTe、ZnO、CdO又はMgO等を用いることができる。さらには、AlGaAs、GaInP、AlGaInP、InGaAsP、AlGaN、InGaN、ZnCdSe又はMgZnO等の化合物半導体の混晶材料を用いてもよい。

また、半導体発光素子の基板材料には、上記の化合物半導体のうち導電性を持つ半導体基板を用いることにより、基板の素子形成面と反対側の面に電極を形成できるため、素子の製造プロセスを簡単化することができる。

一方、基板材料に、上記の化合物半導体のうちの半絶縁性基板、又はサファイア若しくは酸化シリコン等からなる絶縁性基板を用いることにより、発光素子の静電容量が低減するため高周波特性が向上する。その上、複数の素子を形成する際に素子同士が絶縁されるので、素子の集積化が容易となる。

#### (第7の実施形態)

以下、本発明の第7の実施形態について図面を参照しながら説明する。

図15は本発明の第7の実施形態に係る半導体発光素子の駆動装置の機能ブロックの構成を示している。

図15に示すように、第7の実施形態に係る半導体発光素子の駆動装置は、pnp型であって、エミッタ、ベース及びコレクタの3端子構成の半導体発光素子701と、第1の電源電圧 $V_{cc1}$ を受け、半導体発光素子701のエミッタに所定の駆動電流 $I_E$ を供給する定電流制御手段としての定電流生成回路702と、制御信号と第2の電源電圧 $V_{cc2}$ を受け、半導体発光素子701のコレクタの電位を制御することにより半導体発光素子701の発光状態を制御する発光状態制御手段としての発光制御回路703とを有している。

ここで、半導体発光素子701のベースは、所定電位印加手段である第1の接地端子704と接続されている。

定電流生成回路 702 は、駆動電流  $I_E$  を半導体発光素子 701 のエミッタにエミッタ・ベース間が順バイアスとなるように供給する。

発光制御回路 703 は、外部から入力される制御信号に応じて半導体発光素子 701 のコレクタを高電位状態又は高抵抗状態と低電位の状態との間で変化させる。

半導体発光素子 701 は、例えば、第 1 の実施形態に係る半導体発光素子のように、コレクタ・ベース間の順方向を正電位とすると、コレクタ電位がベース電位よりも高い電位、すなわち順バイアス状態又は等電位とされた場合に発光状態となる。逆に、十分に低い電位、すなわち逆バイアス状態とされた場合に消光状態となる。

以下、第 7 の実施形態に係る半導体発光素子の駆動装置の発光時及び消光時の駆動方法の具体例を説明する。

まず、発光動作を説明する。

外部からの制御信号により発光制御回路 703 を操作し、半導体発光素子 701 のコレクタからみて発光制御回路 703 を高抵抗状態とすることにより、半導体発光素子 701 は、コレクタの電位がベースとエミッタとの中間の電位となって発光状態となる。また、他の方法として、半導体発光素子 701 は、例えばコレクタを第 2 の接地端子 705 と接地すると、コレクタ・ベース間が等電位となって発光状態となる。

次に、消光動作を説明する。

外部からの制御信号により発光制御回路 703 を操作して、半導体発光素子 701 のコレクタに第 2 の電源電圧  $V_{CC2}$  を印加すると、コレクタ・ベース間が逆バイアス状態となる。この逆バイアス状態により、第 2 の電源電圧  $V_{CC2}$  が十分に大きければ、エミッタから注入される電荷の大部分がコレクタに引き抜かれるため、活性層のキャリア密度が低下する。さらに、活性層におけるキャリアの閉じ込め効果が低下して、コレクタにキャリアが引き抜かれ始めると、エミッタからの注入電流が増加しようとするが、第 7 の実施形態においては、定電流生成回路 702 によってエミッタに供給される電流量が一定となるよう制御されている。

従って、エミッタ・ベース間の順バイアス電圧は低下し、エミッタと活性領域との界面におけるエミッタ側の擬フェルミ準位が低下する。これにより、活性領域とベースとの界面だけでなく、該活性領域とエミッタとの界面においてもキャリア密度が低下するため、活性領域のキャリア密度は大幅に低下し、半導体発光素子701の発光状態はさらに抑制される。

このように、第7の実施形態によると、3端子構成の半導体発光素子701の消光比を容易に且つ確実に高めることができる。

なお、第7の実施形態に係る発光制御回路703の一例として、例えばnpn型のバイポーラトランジスタを用いてもよい。該バイポーラトランジスタのコレクタ端子を半導体発光素子701のコレクタと接続し、エミッタ端子を第2の電源電圧 $V_{cc2}$ と接続し、ベース端子に制御信号が入力されるように接続することにより容易に実現することができる。

また、発光制御回路703に、pnp型のバイポーラトランジスタを用いることもできる。この場合は、バイポーラトランジスタのエミッタ端子を半導体発光素子701のコレクタと接続し、コレクタ端子を第2の電源電圧 $V_{cc2}$ と接続し、ベース端子に制御信号が入力されるようにする。

発光制御回路703の回路構成は、これらnpn型又はpnp型のバイポーラトランジスタに限られない。すなわち、多段のトランジスタ構成でも良く、電界効果型トランジスタ(FET)又は高電子移動度トランジスタ(HEMT)等を用いることにより、駆動動作の安定化及び高速化を図ることも可能である。従って、発光制御回路703の機能を実現できれば、回路構成は限定されない。

#### (第8の実施形態)

以下、本発明の第8の実施形態について図面を参照しながら説明する。

図16は本発明の第8の実施形態に係る半導体発光素子の駆動装置の機能ブロックの構成を示している。

図16に示すように、第8の実施形態に係る半導体発光素子の駆動装置は、npn型であって、エミッタ、ベース及びコレクタの3端子構成の半導体発光素子801と、第1の電源電圧 $V_{cc1}$ を受け、半導体発光素子801のエミッタに所定の駆動電流 $I_E$ を供給する定電流制御手段としての定電流生成回路802と、

制御信号を受け、半導体発光素子 801 のエミッタ又はコレクタの電位を制御することにより半導体発光素子 801 の発光状態を制御する発光状態制御手段としての発光制御回路 803 とを有している。

ここで、半導体発光素子 801 のベースは、所定電位印加手段である第 1 の接地端子 804 と接続されている。

定電流生成回路 802 は、駆動電流  $I_E$  を半導体発光素子 801 のエミッタにエミッタ・ベース間が順バイアスとなるように供給する。

発光制御回路 803 は、外部から入力される制御信号に応じて半導体発光素子 801 のコレクタを高電位状態又は高抵抗状態と低電位の状態との間で変化させる。

半導体発光素子 801 は、例えば、第 3 の実施形態に係る半導体発光素子のように、コレクタ・ベース間の順方向を正電位とすると、コレクタ電位がベース電位よりも高い電位、すなわち順バイアス状態とされた場合に発光状態となる。逆に、ほぼ等電位とされた場合に消光状態となる。

以下、第 8 の実施形態に係る半導体発光素子の駆動装置の発光時及び消光時の駆動方法の具体例を説明する。

まず、発光動作を説明する。

外部からの制御信号により発光制御回路 803 を操作し、半導体発光素子 801 のコレクタからみて発光制御回路 803 を高抵抗状態とすることにより、該半導体発光素子 801 は、コレクタの電位がエミッタとほぼ等電位となり、且つベースに対して順バイアス状態となるため発光する。なお、この場合、発光制御回路 803 は半導体発光素子 801 のエミッタと接続されている必要はない。また、他の方法として、半導体発光素子 801 は、コレクタをエミッタと直接に接続すると、コレクタ・ベース間が順バイアス状態となるため発光する。

次に、消光動作を説明する。

外部からの制御信号により発光制御回路 803 を操作して、半導体発光素子 801 のコレクタを第 2 の接地端子 805 と接続して接地電位を印加すると、コレクタ・ベース間でキャリアの閉じ込めができなくなる。その結果、エミッタから注入される電荷の大部分がコレクタに引き抜かれるため、ベースのキャリア密度

このように、第8の実施形態によると、3端子構成の半導体発光素子801の消光比を容易に且つ確実に高めることができる。

なお、第8の実施形態に係る発光制御回路803の一例として、例えばnpn型のバイポーラトランジスタを用いてもよい。該バイポーラトランジスタのコレクタ端子を半導体発光素子801のコレクタと接続し、エミッタ端子を第2の接地端子805と接続し、ベース端子に制御信号が入力されるように接続することにより容易に実現することができる。この場合の制御信号として、例えば発光時には0V（接地電位）の制御電圧を用い、消光時には0.8V以上の正の制御電圧を用いる。これにより、発光時はバイポーラトランジスタのコレクタ端子の状態が高抵抗状態となり、消光時は接地状態に近い低電位状態（低抵抗状態）となって、本実施形態に係る発光動作及び消光動作の制御が可能となる。

また、発光制御回路 803 に、 $pnp$  型のバイポーラトランジスタを用いることもできる。すなわち、バイポーラトランジスタのエミッタ端子を半導体発光素子 801 のコレクタと接続し、コレクタ端子を第 2 の接地端子 805 と接続し、ベース端子に制御信号が入力されるようにする。この場合の制御信号として、例えば発光時には、半導体発光素子 801 の発光時のエミッタ電位よりも高い制御電圧を用い、消光時には 0 V（接地電位）の制御電圧を用いる。これにより、発光時には、バイポーラトランジスタのエミッタ端子が高抵抗状態となり、消光時は接地電位に近い 0.7 V 程度の低電位状態（低抵抗状態）となるため、本実施形態に係る発光動作及び消光動作の制御が可能となる。

発光制御回路 803 の回路構成は、これら npn 型又は pnp 型のバイポーラトランジスタに限られない。すなわち、多段のトランジスタ構成でも良く、電界効果型トランジスタ (FET) 又は高電子移動度トランジスタ (HEMT) 等を用いることにより、駆動動作の安定化及び高速化を図ることも可能である。従って、発光制御回路 803 の機能を実現できれば、回路構成は限定されない。





【クレーム】

1. 半導体発光素子は、

それぞれが第1導電型の第1の半導体層及び第2の半導体層と、

前記第1の半導体層及び第2の半導体層の間に設けられた第2導電型の第3の半導体層と、

前記第2の半導体層と前記第3の半導体層との間に設けられ、前記第2の半導体層及び第3の半導体層から注入される電荷により発光する活性層と、

前記活性層と前記第3の半導体層との間に設けられ、前記活性層との界面では前記活性層の組成とほぼ同一で且つ前記第3の半導体層との界面では前記第3の半導体層の組成とほぼ同一となるように、その組成が変化する傾斜組成層とを備えている。

2. 半導体発光素子は、

それぞれが第1導電型の第1の半導体層及び第2の半導体層と、

前記第1の半導体層及び第2の半導体層の間に設けられ、電子のエネルギー帯における禁制帯幅が前記第1の半導体層及び第2の半導体層よりも小さい第2導電型の第3の半導体層と、

前記第1の半導体層と前記第3の半導体層との間に設けられ、前記第1の半導体層との界面では前記第1の半導体層の組成とほぼ同一で且つ前記第3の半導体層との界面では前記第3の半導体層の組成とほぼ同一となるように、その組成が変化する傾斜組成層とを備え、

前記第3の半導体層は、前記第2の半導体層及び第3の半導体層から注入される電荷により発光する。

3. クレーム2の半導体発光素子において、

前記第2の半導体層の不純物濃度は、少なくとも前記第1の半導体層と対向する側の領域が前記第1の半導体層の不純物濃度よりも大きい。

4. 半導体発光素子は、

それぞれがp導電型の第1の半導体層及び第2の半導体層と、

前記第1の半導体層及び第2の半導体層の間に設けられ、電子のエネルギー帯における禁制帯幅が前記第1の半導体層及び第2の半導体層よりも小さいn

導電型の第3の半導体層とを備え、

前記第3の半導体層は、前記第2の半導体層及び第3の半導体層から注入される電荷により発光し、

電子のエネルギー帯における価電子帯の上端のエネルギー値は、前記第1の半導体層の方が、前記第2の半導体層よりも小さい。

5. クレーム4の半導体発光素子において、

前記第2の半導体層の不純物濃度は、少なくとも前記第1の半導体層と対向する側の領域が前記第1の半導体層の不純物濃度よりも大きい。

6. 半導体発光素子は、

それぞれがn導電型の第1の半導体層及び第2の半導体層と、

前記第1の半導体層及び第2の半導体層の間に設けられ、電子のエネルギー帯における禁制帯幅が前記第1の半導体層及び第2の半導体層よりも小さいp導電型の第3の半導体層とを備え、

前記第3の半導体層は、前記第2の半導体層及び第3の半導体層から注入される電荷により発光し、

電子のエネルギー帯における伝導帯の下端のエネルギー値は、前記第1の半導体層の方が、前記第2の半導体層よりも大きい。

7. クレーム6の半導体発光素子において、

前記第2の半導体層の不純物濃度は、少なくとも前記第1の半導体層と対向する側の領域が前記第1の半導体層の不純物濃度よりも大きい。

8. 半導体発光素子は、

それぞれが第1導電型の第1の半導体層及び第2の半導体層と、

前記第1の半導体層及び第2の半導体層の間に設けられ、電子のエネルギー帯における禁制帯幅が前記第1の半導体層及び第2の半導体層よりも小さい第2導電型の第3の半導体層と、

前記第1の半導体層と前記第3の半導体層との間に設けられ、前記第1の半導体層及び前記第3の半導体層の不純物濃度よりも小さい不純物濃度を持つ低濃度半導体層とを備え、

前記第3の半導体層は、前記第2の半導体層及び第3の半導体層から注入さ

れる電荷により発光する。

9. クレーム8の半導体発光素子において、

前記低濃度半導体層は、不純物がドーピングされていない無添加層である。

10. クレーム8の半導体発光素子において、

前記低濃度半導体層は第2導電型である。

11. 半導体発光素子の駆動装置は、

それぞれが第1導電型の第1の半導体層及び第2の半導体層と、

前記第1の半導体層及び第2の半導体層の間に設けられた第2導電型の第3の半導体層とを有する半導体発光素子を駆動する駆動装置であって、

定電流制御手段と、

前記半導体発光素子の発光状態を制御する発光状態制御手段と、

前記半導体発光素子の前記第3の半導体層に所定の電位を印加する所定電位印加手段とを備え、

前記定電流制御手段は、前記半導体発光素子の前記第2の半導体層に対して所定の駆動電流を供給し、

前記発光状態制御手段は、前記第1の半導体層に対して互いに異なる電圧を印加するか、又は前記第1の半導体層を互いに異なるインピーダンス状態とすることにより、前記半導体発光素子の発光量を調節する。

# 【アブストラクト】

半導体発光素子は、それぞれが第1導電型の第1の半導体層及び第2の半導体層と、第1の半導体層及び第2の半導体層の間に設けられた第2導電型の第3の半導体層と、第2の半導体層と第3の半導体層との間に設けられ、第2の半導体層及び第3の半導体層から注入される電荷により発光する活性層とを有している。活性層と第3の半導体層との間には、活性層との界面では活性層の組成とほぼ同一で且つ第3の半導体層との界面では第3の半導体層の組成とほぼ同一となるように、その組成が変化する傾斜組成層が形成されている。

09090219-070204  
T030204-070204